

清华大学能源动力系列教材

**燃烧学导论：概念与应用  
(第2版)**

**An Introduction to Combustion  
Concepts and Applications  
(Second Edition)**

Stephen R. Turns 著

姚强 李水清 王宇 译  
Yao Qiang Li Shuiqing Wang Yu

清华大学出版社

Mc  
Graw  
Hill Education

清华大学能源动力系列教材

# 燃烧学导论：概念与应用 (第2版)

## An Introduction to Combustion Concepts and Applications (Second Edition)

Stephen R. Turns 著

姚强 李水清 王宇 译  
Yao Qiang Li Shuiqing Wang Yu

清华大学出版社

北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2004-6865

Stephen R. Turns

**An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Second Edition**

ISBN: 0-07-230096-5

Copyright © 2000, 1996 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education(Asia) Co. and Tsinghua University Press.

本书中文简体字翻译版由清华大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

燃烧学导论:概念与应用:第2版/(美)特纳斯(Turns, S.R.)著;姚强,李水清,王宇译。  
—北京:清华大学出版社,2009.4

(清华大学能源动力系列教材)

书名原文:An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Second Edition  
ISBN 978-7-302-18762-2

I. 燃… II. ①特… ②姚… ③李… ④王… III. 燃烧学—高等学校—教材 IV. O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161818 号

责任编辑:曾洁

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:35 字 数:762 千字

附光盘 1 张

版 次:2009 年 4 月第 1 版 印 次:2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:65.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:017522-01

能源在我们日常生活中的重要性是无论如何也不能低估的。用各种能源产生的电点亮了我们的家、学校、商业区和工作环境。液体燃料几乎提供了我们所有的机动车能源：摩托车、小汽车、货车、公交车、火车和飞机。各种能源还用于各种产品的制造过程：从小小的别针到高达 20 层楼高的巨大索斗式掘煤机。大量使用能源正是现代社会的象征。

只要略加注意就会发现，终端使用的能源主要来自矿物燃料的燃烧。对于所有的终端使用部门，如民用居住、商业、工业和交通都是如此。根据美国能源信息处的报告，中国在 2004 年的总发电量为 20 797 亿 kW·h，其中 81.8% 来自矿物燃料的燃烧。发电的第二大来源是水电，占 15.8%。2004 年中国有总能源消耗是  $59.6 \times 10^{15}$  Btu（即 21.5 亿 t 标煤，译注），其中矿物燃料占了近 94%（煤 69%，油 22%，天然气 3%）。这些数字清楚地表明了燃烧在中国的重要性。尽管不同的国家矿物燃料产生的能源的量有所不同，但从全球来看，矿物燃料占有绝对主导地位，这就意味着燃烧在全世界都是一个重要的问题。

世界根据燃烧这一事实提出一系列有趣且有挑战性的课题：矿物燃料的采矿和钻探；广泛使用中的燃料的有效使用；燃烧产生的空气污染物的控制，包括传统的空气污染物（氮氧化物、硫氧化物、一氧化碳等），也包括空气毒物（如汞等）和温室气体（二氧化碳、甲烷和氮氧化物等）。空气污染问题由于将水的使用和垃圾填埋与煤的燃烧交织在一起而更趋复杂，比如，飞灰和二氧化硫的控制就会带来大量的固体废物需要进行妥善的处置。

当代的燃烧工程师会感到有很多问题需要去解决。燃烧，特别是煤的燃烧，它是 CO<sub>2</sub> 的首要来源，是造成全球气候变化的主要温室气体。创造出零碳（CO<sub>2</sub>）或近零碳排放的有用的能源的可行方法是目前全球研究的热点。在未来几十年中，产生零碳排放的能源将是一个主导的方向。对燃烧工程师的一个直接相关的问题是从纤维素生产生物质燃料及其使用。这些燃料既可以再生，又可实现零碳排放。

要创造有效的、环境友好的用燃烧产生的能源，需要燃烧过程的基础

知识和实用知识。作者和译者将这本书呈现给你，就是帮助你理解燃烧原理的基本内容。而这些基本的原理可以用于解决实际问题，同时还可以作为这一令人兴奋的领域的深入学习的入门书。我们希望通过对本书的学习可以帮助你从事你所在地区、你的国家和全世界所面临的问题。

**Stephen R. Turns**

2008年5月于美国宾夕法尼亚州大学城

## 第2版前言

P  
R  
E  
F  
A  
C  
E

与第1版一样,第2版的目的是有两个:首先是采用相对简单和易于理解的分析来介绍燃烧的基本概念;第二是引入各种实际应用,并与各种理论概念相联系以激发学习兴趣。本书既可以用于机械工程和相关领域的本科教学,又可供工程师们自学。

作者和许多同行还发现本书可以作为研究生在燃烧学领域的初级教程。当然,本书单独使用可能无法满足这一要求,教师需要提供相应的更详细的素材和高级课题。尽管如此,许多同行利用本书还是很成功的。第2版特别为此在某些方面提供了更多及更深入的讨论。如第7章中增加了一节讨论多组分扩散和热扩散。在第7章和第8章中,还增加了包括多组分和热扩散的一维能量方程的推导,其形式与位于美国加利福尼亚州利弗莫尔的圣地亚国家实验室发展的几种火焰程序所用的形式相同。在课程中,教师可以很好地将这些程序与CHEMKIN软件结合起来使用。同样,第9章中增加了一节来讨论对冲扩散火焰。这些增加的内容不会降低本书用于更低年级的可能性。这些高级的课题相对独立,可以略过而不会影响其连续性。此外,增加的内容并不多,这样教材的总长度也没有明显的增加。本书还保持了原有的通俗易懂和结构紧凑的写作风格。

第2版的变化还包括第2章中附加了一个燃料分子结构的简单讨论。这一附录对于领会第2章中许多热化学概念是很有用的,同时也为第4章和第5章中出现的化学动力学概念提供了背景知识。第4章中还增加了关于局部平衡和特征时间尺度的讨论。而第5章则加入了甲烷燃烧动力学方面的最新成果(GRI-Mech),并且引入了甲烷-空气燃烧反应途径的图解以给出甲烷燃烧动力学的清晰和完整的图像。第6章增加了一个全混流反应器化学反应动力学的例子,是与CHEMKIN软件联用的又一个例子。在第8章中,增加了对预混火焰结构方面的讨论,使我们对这一重要课题有更清晰、更详细的了解。另外还专门增加了爆震一章(第16章),以满足在课堂上希望包括这一内容的要求。逻辑上讲,这一部分内容可以跟在第2章或第8章后。许多章节中还增加了习题和例题。对于那些需要用或最好用计

计算机来求解的习题进行了专门标注。配书光盘中的计算机软件也根据 Windows 操作系统的要求进行了更新。

作者希望这一新版书能继续为把本书作为基础教程的人员服务,同时本版中新增加的内容能使本书用于高年级的课程学习。

**Stephen R. Turns**

于美国宾夕法尼亚州大学城

# 第1版前言

## P R E F A C E

许多学工程的学生对燃烧和燃烧应用有很高的兴趣。尽管在许多大学中开设有燃烧或与燃烧相关的大学生高年级课程,然而为这样的课程找一本合适的教科书却是一件难事。本书是为满足燃烧入门的课程,特别为大学生学习而设计的。作者在美国宾夕法尼亚州州立大学讲授一门燃烧导论课,并需要写出一本导论性的教科书,这两个因素促成了本书的产生。

本书最初设想的对象是机械和相关工程领域的高年级学生,其他的读者亦可发现此书为应用热学知识解决高等燃烧问题提供了桥梁。本书给出了许多实例和习题,便于读者理解或联系实际。因此,希望一年级的研究生和工程师们也可以从这些内容中获益。

在结构上,本书具有很大的灵活性。总共 15 章的内容对于只有一个学期的课程显得太多了。本书可以使教师在规划一门课的内容时满足不同内容和组合的需求,同时可以方便地使主题进行延伸或转换。以一个学期的课程为例,选择第 1~6,15,8,9,14 章可以组成一个最通用的课程;而如果是一门以火花点火的发动机为主的课程则可以选择第 1~6,8,12,15,9 章。

第 1~3 章的内容对于本科生来说是最基本的。第 1 章给出了燃烧和火焰的定义及种类,介绍了燃烧产生的大气污染物的影响与控制,这部分内容在第 15 章中有更详细的介绍。

第 2 章提供了学习燃烧所需的热化学知识。这一章强调了化学平衡对燃烧的重要性。本书光盘中的软件给学生提供了一个简便的方法来计算燃烧产物的复杂平衡。这一软件还可用于许多有趣的和辅助教学的项目训练。第 3 章介绍传质,在全书中都采用将所有的传质处理为简单的二元系统以简化理论推导的方法。除了在第 7 章中简单提到外,多元扩散的问题留给更高级的课程去讲授。这样的简化有利于没有接触过传质的学生很好理解传质问题而不陷入其固有的复杂性。第 3 章采用了经典的斯蒂芬问题和单液滴蒸发问题来阐明传质理论。

第 4 章和第 5 章讨论化学动力学问题,首先介绍基本概念(第 4 章),然后讨论对于燃烧来说重要的化学机理和燃烧产生的大气污染物(第 5 章)。除了介绍不可避免的复杂的碳氢化合物燃烧化学外,还引入了简化的一步和多步反应动力学,并将化学动力学用于简单的分析与模型中,据此了解简化动力学的作用与缺陷。



第6章的主要内容是将化学动力学与热力学模型进行关联。导出了定压和定容反应器、全混流和柱塞流反应器四种模型。这些简化的模型可以让学生清楚地掌握化学动力学是如何用于更大的实际情形的。第6章也提供了许多用于反应器分析与设计的项目。本章的有效性和独特性相映成趣。

在前几章学习了热化学、分子输运和化学动力学后，第7章导出了在后续各章中将用到的反应系统的简化守恒方程。这一章引入了两个守恒标量的方法来简化反应流的求解问题。目的是为更严格的推导提供基础。对于本科生来说，这一章可任选，完全可以跳过去；但是对于研究生的入门课程，这一章还是很有用的。

第8~13章是对各种火焰基本问题的描述。第8章讨论层流预混火焰，第9章和第10章讨论层流非预混火焰。湍流火焰问题在第12章(预混)和第13章(非预混)中讨论，主题包括火焰传播、着火、灭火和火焰稳定。尽可能地采用简化的分析方法，并强调实际的应用。为了更好地理解最基本的内容，尽可能地避开了严谨的数学推导。这样做有时可能对某些现象无法完全解释。对于这些情况，一般会提醒读者注意并提供相关的参考文献，以利读者能找到更完全的理解。由于这些材料很丰富，读者完全可以方便地只选择层流火焰(第8, 11, 12章)或只选择非预混火焰(第9, 10, 13章)来读。如果课程特别强调某方面的应用，可以提出特定的内容。

与实际装置有关的液滴蒸发理论属于第10章后半部分的内容，推导了一维蒸发控制的燃烧室模型。这一节的基本目的就是加强前面的平衡和蒸发的概念，帮助提高学生分析问题的能力，并提供在工程应用项目中要用到的思路与概念。设计项目可以很方便地加入到第10章的构架中。按课程的目的，第10章的这一节也是可选的。

第14章中以碳燃烧作为原型系统介绍固体的燃烧，同样使用简化的分析方法来阐释非均相燃烧的概念并引入了扩散控制和动力学控制燃烧的概念。这一章中也给学生提到了煤的燃烧及其应用的初步概念。

在现代的燃烧学书中完全忽略燃烧产生的污染问题是不可想象的。第15章是专门针对这一问题而写的。这一章介绍污染物的定量概念并讨论了污染物产生的机理及其控制方法。这一章强调应用，对于专门的读者会有特别的吸引力。这一章的位置并不意味着其不重要。取决于课程的目标，这些素材可以跟在第1~6章后用。

最后总结一下，本书的目的是为机械工程和相近专业领域的本科高年级学生提供一个易于理解的燃烧学入门课程的教材。通过例题和作业，学生可以在他们的理解力方面以及进一步应用到不同的项目和“实际世界”的问题方面产生自信心。希望这本教科书能满足教师的需求，同时也能对那些渴望获得结构简化和恰当的素材的读者，提供燃烧这一引人入胜的领域的学习入门书。

**Stephen R. Turns**

于美国宾夕法尼亚州大学城

# 致 谢

许多人给本书的第1版或第2版提供了时间和精神上的支持。首先,我要感谢在整个过程中做出贡献的评审人,特别要提到的是密歇根大学的吉姆·德里斯科尔(Jim Driscoll)、普渡大学的诺姆·罗兰度(Norm Laurendeau),密歇根州立大学的约翰·劳埃德(John Lloyd),康奈尔大学的米高·卢格(Michel Louge),爱荷华州立大学乔恩·范·吉平(Jon Van Gerpen)和阿肯色大学的卡尔·维克斯特朗(Carl Wikstrom)。他们对本书第1版的草稿提出了许多有价值的意见。同时,在瑞萨莱尔理工学院(RPI)采用本书的不同版本讲授课程的史蒂夫·高贝尔(Steve Goebel)和艾伦·法伊特贝尔格(Alan Feitelberg)提出的详细意见也弥足珍贵。他们还慷慨地将一些有趣的习题提供给大家,这些习题已经收入在第2版中。我的同事与朋友查克·默克勒(Chuck Merkle)在第1版中对内容和教学方法两个方面都给予了持续的精神鼓励和积极宣传。宾州大学的许多学生也用各种方式作出了他们的贡献。特别是杰夫·布朗(Jeff Brown)、李钟根(Jongguen Lee)和迈克尔先生(Don Michael)。还要特别感谢桑卡兰·温卡特斯沃伦(Sankaran Venkateswaran)提供了湍流射流火焰模型的计算。同样的还有戴夫·克兰多尔(Dave Crandall)为第2版的软件包提供的帮助。穆勒先生(Donn Mueller)对第1版的所有习题进行了艰苦的求解工作。还要感谢挚友凯西·温德兰德(Kathy Wendland),她为第2版的编辑工作提供了帮助。还要感谢气体研究所多年来对我研究工作的支持,这些研究作为写作本书提供了最初的灵感和动力。对于我来说,最宝贵的是来自家里的不倦的支持,他们惊人地容忍着我将周末和假期的时间花费在写作上,这些时间本来是应该与他们在一起度过的。最后要感谢的是谢丽尔·亚当斯(Cheryl Adams)。没有她,这两个版本的完成都是难于想象的。她对草稿进行打字及文字处理并制作了书中的许多图表。正是谢丽尔的可靠技能使我感到写这本书是一段愉快的经历。

此书献给

我的妻子 Joan 和我们的两个儿子

Matthew 和 Michael

——Stephen R. Turns

## 关于作者

Stephen R. Turns 于 1970 年、1974 年和 1979 年分别在宾夕法尼亚州立大学、韦恩州立大学和威斯康星大学麦迪逊分校获得机械工程学士、硕士和博士学位。1970 年到 1975 年在通用汽车公司研究实验室任研究工程师。1979 年成为宾夕法尼亚州立大学教师，目前是机械工程教授。Turns 博士讲授热科学方面的多门课程，并多次获得宾州大学的杰出教师奖。他在燃烧研究方面十分活跃，发表了许多论文，而且是国际燃烧学会、美国机械工程师学会和美国汽车工程师学会一名活跃的会员。

## 常用元素的相对原子质量(1981年)

铝	Aluminum	Al	26.9815
氩	Argon	Ar	39.948
铍	Beryllium	Be	9.012 18
硼	Boron	B	10.81
溴	Bromine	Br	79.904
钙	Calcium	Ca	40.08
碳	Carbon	C	12.011
氯	Chlorine	Cl	35.453
铜	Copper	Cu	63.546
氟	Fluorine	F	18.9984
氦	Helium	He	4.00260
氢	Hydrogen	H	1.007 94
氪	Krypton	Kr	83.80
镁	Magnesium	Mg	24.305
氮	Nitrogen	N	14.0067
氧	Oxygen	O	15.9994
铂	Platinum	Pt	195.08
硅	Silicon	Si	28.0855
钠	Sodium	Na	22.9898
硫	Sulfur	S	32.06
氙	Xenon	Xe	131.29

## 物理常数<sup>①</sup>

阿伏加德罗常数	Avogadro number	$N_{AV}$	$(6.022\ 136\ 7 \pm 0.000\ 003\ 6) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
玻耳兹曼常数	Boltzmann constant	$k_B$	$(1.380\ 658 \pm 0.000\ 012) \times 10^{-23} \text{ J/K}$
普朗克常量	Planck constant	$h$	$(6.626\ 075\ 5 \pm 0.000\ 004\ 0) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
真空中的光速	Speed of light in vacuum	$c$	299 792 458 m/s
标准重力加速度	Standard acceleration of gravity	$g$	9.806 65 m/s <sup>2</sup>
标准大气压	Standard atmosphere	atm	101 325 Pa
斯忒藩-玻耳兹曼常数	Stefan-Boltzmann constant	$\sigma$	$(5.670\ 51 \pm 0.000\ 19) \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
通用气体常数	Universal gas constant	$R_u$	$(8314.510 \pm 0.070) \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

---

<sup>①</sup> 摘自 E. R. Cohen, and B. N. Taylor, "The Fundamental Physical Constants" *Physics Today*, August 1993, pp. 9-13.

## 换算系数

量的名称	单位符号	换算系数
能量	J	1J = 9.478 17 × 10 <sup>-4</sup> Btu = 2.3885 × 10 <sup>-4</sup> kcal
功率	W	1W = 3.412 14 Btu/h
力	N	1N = 0.244 809 lbf
热流量	W/m <sup>2</sup>	1W/m <sup>2</sup> = 0.3171 Btu/(h · ft <sup>2</sup> )
运动黏度和扩散系数	m <sup>2</sup> /s	1m <sup>2</sup> /s = 3.875 × 10 <sup>4</sup> ft <sup>2</sup> /h
长度	m	1m = 39.370 in = 3.2808 ft
质量	kg	1kg = 2.2046 lb
质量密度	kg/m <sup>3</sup>	1kg/m <sup>3</sup> = 0.062 428 lb · ft <sup>3</sup>
质量流量	kg/s	1kg/s = 7936.6 lb/h
压力	Pa	1Pa = 1N/m <sup>2</sup> = 0.020 885 4 lbf/ft <sup>2</sup> = 1.4504 × 10 <sup>-4</sup> lbf/in <sup>2</sup> = 1.4504 × 10 <sup>-4</sup> psi = 4.015 × 10 <sup>-3</sup> inH <sub>2</sub> O = 2.953 × 10 <sup>-4</sup> inHg 1 × 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup> = 1 bar
比热容	J/(kg · K)	1J/(kg · K) = 2.3886 × 10 <sup>-4</sup> Btu/(lb · °F)
温度	K	1K = (5/9)°R = (5/9)(°F + 459.67) = °C + 273.15
时间	s	3600s = 1h

相对而言,人类通过洞穴中出现的第一缕闪烁的火光认识了自己的存在,感受到了自己的成功,体验了对自然的把握。在那残忍的黑暗和隐现的阴影中,火的发现象征着对化学过程的理解、蒸汽动力时代的到来和整个工业的革命。它还预示着整个人类的未来。

**Loren Eiseley**

*The Unexpected Universe* (神奇的宇宙)



# 目 录

# C O N T E N T S

第1章 导论	1
1.1 学习燃烧学的动机	1
1.2 燃烧的定义	5
1.3 燃烧方式与火焰种类	5
1.4 学习方法	6
1.5 参考文献	7
第2章 燃烧与热化学	8
2.1 概述	8
2.2 热力学性质关系式回顾	8
2.2.1 广延量和强度量	8
2.2.2 状态方程	9
2.2.3 状态的热方程	9
2.2.4 理想气体混合物	11
2.2.5 蒸发潜热	12
2.3 热力学第一定律	13
2.3.1 第一定律——定质量	13
2.3.2 第一定律——控制体	14
2.4 反应物和生成物的混合物	15
2.4.1 化学计量学	15
2.4.2 绝对(或标准)焓和生成焓	19
2.4.3 燃烧焓和热值	21
2.5 绝热燃烧温度	24
2.6 化学平衡	28
2.6.1 第二定律的讨论	28
2.6.2 吉布斯函数	29
2.6.3 复杂系统	34
2.7 燃烧的平衡产物	35
2.7.1 全平衡	35
2.7.2 水煤气反应的平衡	36
2.7.3 压力影响	39